

УДК 621.983

В.Л.Калюжний, д-р техн.наук, М.С.Ніколенко, студ., О.В.Коваленко, студ.
НТУ України „Київський політехнічний інститут”, м.Київ, Україна

АНАЛІЗ ХОЛОДНОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ КВАДРАТНИХ І ПРЯМОКУТНИХ КОРОБОК ІЗ СТАЛІ І АЛЮМІНІЮ

Методом конечных элементов выполнен теоретический анализ процессов холодного обратного выдавливания квадратных и прямоугольных коробок из малоуглеродистой стали и пластичного алюминия. Определены зависимости усилия выдавливания от перемещения деформирующего инструмента, распределение удельных усилий на пуансоне, матрице, выталкивателе. Установлена конечная геометрия изделия, напряженно-деформированное состояние, упрочнение и степень использования ресурса пластичности металла после деформации. На основании расчетных данных разработана технология холодного выдавливания коробчатых деталей.

The theoretical analysis of cold backward extrusion processes of square and rectangular boxes from a low-carbon steel and plastic aluminum was carried out by a finite element method. Dependences of deforming force on displacement of the warping instrument, distribution of intensity to the punch, a matrix, an ejector are defined. The final geometry of the details, the mode of deformation, strengthening and ratio of metal plasticity resource after deformation were determined. By results of calculation the manufacturing method of box is developed

Вступ. Квадратні і прямокутні коробки достатньо розповсюджені типи деталей, які виготовляють холодним зворотним видавлюванням із алюмінію і пластичних сталей. Для видавлювання коробок мають місце обмеження на мінімальні товщини стінки і дна, а також на максимальну глибину порожнини, що видавлюється [1]. По даним джерела [2] холодним видавлюванням можна виготовляти наступні коробчаті деталі: із олова і алюмінію розмірами в плані від 2х4 міліметрів (мм) до 200х100 мм і товщиною стінок від 0,1 мм і більше; із сплавів на основі алюмінію, міді і латуні з розмірами в плані від 3х5 до 160х80 мм і товщиною стінок більше 0,5 мм; із сталей 10, 15, Ст3 з розмірами в плані від 5х10 мм до 100х60 мм і товщиною стінок більше 0,6 мм. Висота отриманих деталей може досягати 2-5 довжин по більшій стороні перерізу деталі, співвідношення довжини до ширини в плані може бути від 1 до 5. Точність розмірів деталей після видавлювання відповідає 12-14 квалітетам, чистота поверхні Rz 1,25. Як показали експериментальні дослідження і виробничий досвід холодного видавлювання коробок, при формоутворенні деталей має місце суттєва нерівномірність деформацій, яка приводить викривлення торців стінок. Для прямокутних коробок висота стінок по довшій стороні більша, чим висота по короткій стороні, а для квадратних коробок висота стінок між кутами завжди більше, чим в кутових зонах [2]. Тому необхідна складна операція підрізання торців стінок, що, в свою чергу, знижує коефіцієнт використання металу. Проектування технології холодного видавлювання порожнистих виробів, зокрема коробчатих, в основному зводиться до наближеного визначення зусилля видавлювання [3]. Практично відсутні дані по розрахунку геометричної форми виробів, зміцнення zdeформованого металу. Для впровадження холодного видавлювання коробчатих виробів необхідно доопрацювання технологічних параметрів трудомісткими і великої вартості експериментальними роботами. Крім того, необхідно для цього витратити багато часу. Тому актуальними стають задачі створення математичних моделей вказаних процесів, зокрема скінченно-елементних, які враховують основні фактори, що впливають на процес холодного формоутворення виробів, та дозволяють визначити силові режими видавлювання, кінцеву геометричну форму виробів з урахуванням максимального ступеня деформації без руйнування.

Постановка задачі. Метою даної роботи є розроблення скінченно-елементних моделей холодного видавлювання коробчатих виробів, проведення комп'ютерного моделювання та визначення параметрів для проектування технології: зусилля видавлювання і роботи деформації – для вибору ковально-пресового обладнання, розподілу питомих зусиль на деформуючому інструменті – для проектування штампного оснащення, кінцеву геометрію і зміцнення zdeформованого металу – для прогнозування і забезпечення якості виробів. При розрахунковому аналізі враховані наступні параметри: конструктивні (геометрична форма пуансонів, матриць, виштовхувачів), технологічні (форма заготовки, ступінь деформації, тертя на контактуючих поверхнях, швидкість деформування) та фізико-механічні (пружні властивості, діаграма істинних напружень, діаграма пластичності матеріалу заготовки). Метал, що деформується, вважався пружно-пластичним. Процес видавлювання моделювався в покроковому режимі для виявлення моменту руйнування металу при формоутворенні виробів. Деформуючий інструмент рахувався як абсолютно жорсткий. Схема зворотного видавлювання коробчатих виробів, на основі якої створена розрахункова схема для моделювання методом скінченних елементів (МСЕ), приведена на рис. 1. Квадратна або прямокутна заготовка 4 встановлена в матриці 1 на виштовхувач 3. Видавлювання виконується за допомогою пуансону 2, який зміщувався на кожному кроці навантаження на 0,05 мм.

Результати досліджень. Проведене моделювання зворотного видавлювання квадратних коробок із сталі 10. Розміри заготовки: $a_m=b_m=40$ мм, $H=30$ мм. Розміри пуансону і матриці: $a_p=b_p=20$ мм, $h=2$ мм, $r_p=r_m=0,5$ мм, $r_{p1}=2$ мм.

На рис. 2 показана кінцева геометрична форма виробу, яка отримана моделюванням. Після видавлювання має місце викривлення торця стінки між кутами, що підтверджується експериментальними даними з джерела [2].

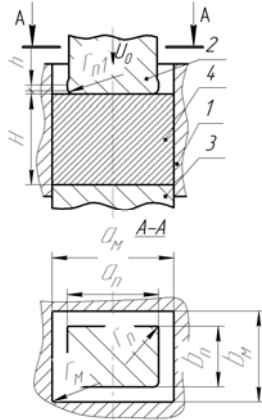


Рис. 1. Схема зворотного видавлювання коробчатих виробів

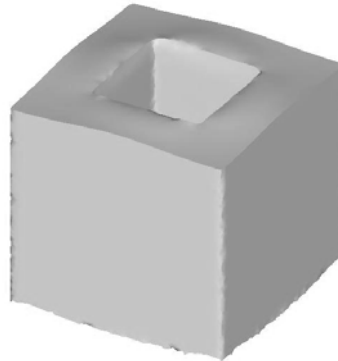


Рис. 2. Кінцева форма виробу

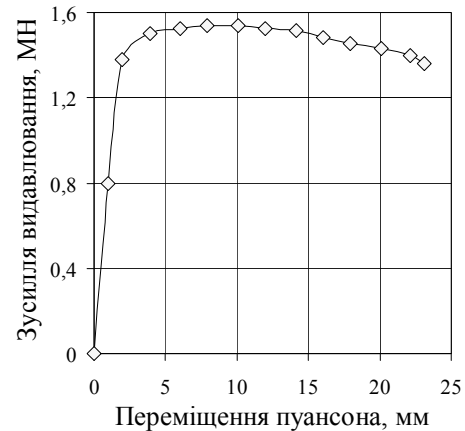


Рис. 3. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

Розрахункова залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону приведена на рис. 3. Спочатку зусилля зростає до моменту виходу металу в зазор між калібруючим пояском висотою h і матрицею (неусталена стадія), потім зусилля зменшується на усталеній стадії до тих пір поки осередок деформації під пуансоном досягне виштовхувача. По вказаному графіку можливо визначити роботу деформації, як добуток максимального зусилля (1,54 МН) на переміщення пуансону (24 мм).

Моделюванням встановлений напружено-деформований стан по всьому об'єму zdeформованої заготовки. Це дозволило виявити розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях між заготовкою і деформуючим інструментом. Вказаний розподіл дозволяє визначити питомі зусилля на деформуючому інструменті.

На рис. 4 представлений розподіл нормальних напружень на поверхні заготовки, яка контактує з пуансоном. На вісі пуансону напруження досягають величини -1500 МПа з поступовим збільшенням до -2000 МПа на розмірі 6,3 мм і подальшим зменшенням до краю пуансону.

Розподіл нормальних розпираючих напружень по висоті матриці показаний на рис. 5. Максимальне по абсолютній величині значення цих напружень (1500 МПа) виникає напроти осередку деформації в заготовці. Між стінкою zdeформованої заготовки і матрицею отримані значення -400 МПа.

На рис. 6 наведений розподіл нормальних напружень на поверхні заготовки, яка контактує з виштовхувачем. Максимальні по абсолютній величині значення (1340 МПа) виникають на вісі виштовхувача з подальшим суттєвим зменшенням (250 МПа) до краю виштовхувача.

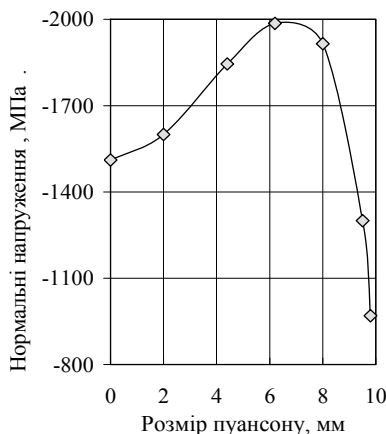


Рис. 4. Розподіл нормальних напружень на пуансоні

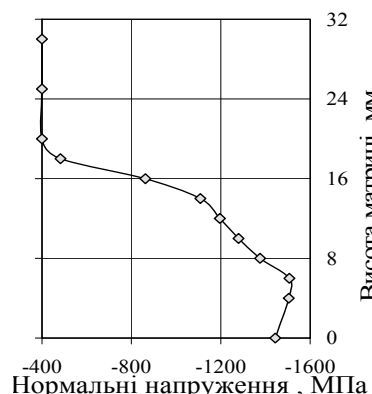


Рис. 5. Розподіл нормальних напружень на стінці матриці

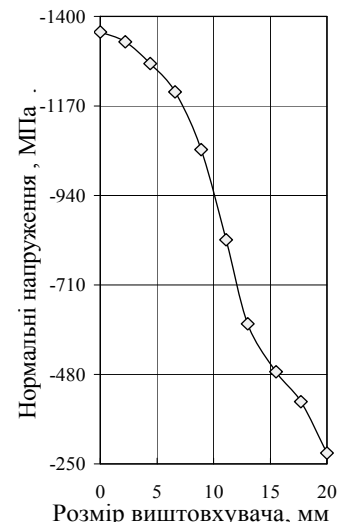


Рис. 6. Розподіл нормальних напружень на виштовхувачі

Важливою перевагою виготовлення виробів холодним видавлюванням є інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією та зміцнення zdeформованого металу. Це дозволяє замінити марку

матеріалу виробу на більш дешево без зміни його службових властивостей. Пропрацювання структури металу можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ϵ_i . На рис. 7 показаний розподіл вказаних деформацій в перерізі по висі zdeформованої заготовки. По ширині стінки розподіл ϵ_i нерівномірний. В третині стінки виробу зі сторони порожнини $\epsilon_i = 0,92$ в зовнішній частині стінки $\epsilon_i = 0,33$. Величини деформацій відрізняються в 2,8 рази. Як наслідок такого розподілу проходить зміцнення zdeформованого металу, яке можна оцінити по розподілу інтенсивності напружень σ_i .

На рис. 8 представлений розподіл інтенсивності напружень σ_i в осередку деформації під пуансоном. Безпосередньо в заготовці під пуансоном є недеформована частина заготовки. По ширині стінки зміцнення також нерівномірне. Третина стінки зі сторони порожнини зміцнюється до величини 110 МПа. В зовнішніх шарах металу стінки $\sigma_i = 750$ МПа. Тому в стінці можна прогнозувати істинне напруження величиною 925 МПа. Це в 3,5 разів більше за умовну течію металу вихідної заготовки.



Рис. 7. Розподіл інтенсивності деформацій в заготовці

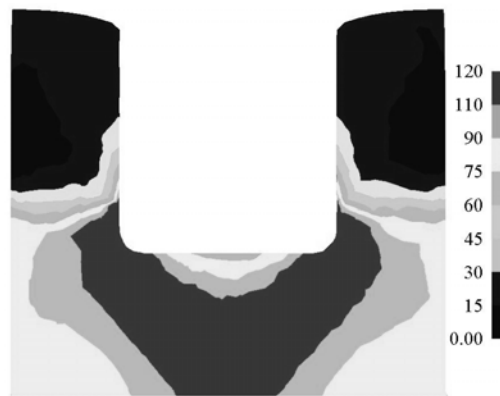


Рис. 8. Розподіл інтенсивності напружень в осередку деформації

Далі наведемо результати розрахункового аналізу холодного зворотного видавлювання прямокутних коробок із алюмінієвого сплаву АД1.

Вихідні заготовки мали наступні розміри: $a_m = 40$ мм, $b_m = 30$ мм і $H = 30$ мм (див. рис. 1). Здеформовані заготовки розмірами показані на рис. 9. На рис. 9а представлена заготовка, яка отримана зворотним видавлюванням пуансоном з $a_p = 34$ мм, $b_p = 24$ мм, $h = 2$ мм, $\Gamma_p = \Gamma_m = 0,5$ мм, $\Gamma_{p1} = 2$ мм (товщина стінки $s = 3$ мм), а на рис. 9б – пуансоном з розмірами $a_p = 36$ мм, $b_p = 26$ мм (товщина стінки $s = 2$ мм). Якщо брати ступінь деформації ϵ при видавлюванні коробок, як відношення площі деформуючого пуансона до площі заготовки з помноженням на 100%, то при видавлюванні з $s = 3$ мм маємо $\epsilon = 68\%$, а при $s = 2$ мм – $\epsilon = 78\%$. При даних розмірах заготовок коробки після видавлювання мають виступи в кутових зонах.

Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону зображена на рис. 10. Зменшення товщини стінки на 1 мм (збільшення ступеню деформації на 10 %) приводить до збільшення зусилля видавлювання на 100 кН.

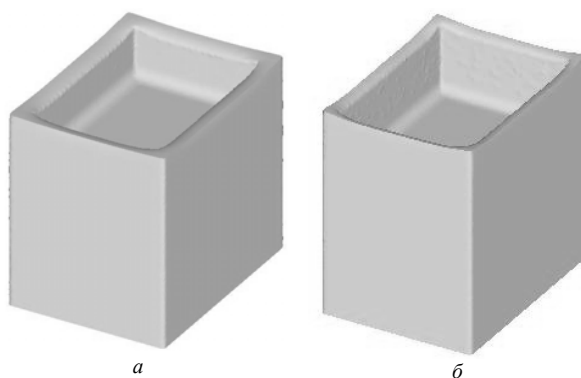
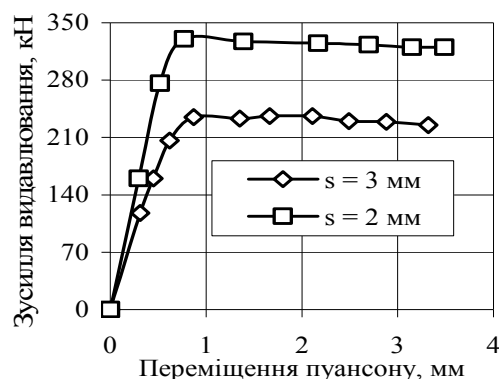
Рис. 9. Здеформовані заготовки: а – $s = 3$ мм; б – $s = 2$ мм

Рис. 10. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона

Розподіли нормальних напружень на пуансоні прямокутної форми по більшому розміру a_p і меншому b_p (див. рис. 1) показані на рис. 11. В силу симетрії показані величини напружень від вісі до краю пуансонів. Характер розподілу по більшому і меншому розмірах однаковий. Однак, величини напружень відрізняються, на меншому розмірі пуансоні вони більші по абсолютній величині. Максимальні значення мають місце на розмірі, що складає $\frac{3}{4}$ довжини від вісі. Так при видавлюванні коробки з товщиною стінки $s = 2$ мм максимальне значення нормальних напружень 340 МПа, а при видавлюванні з $s = 3$ мм – 275 МПа.

На рис. 12 представлені розподіли нормальних напружень на більшому розмірі a_m і меншому розмірі b_m виштовхувача. Характер розподілу аналогічний розподілу на пуансоні, хоча величини напружень на більшому розмірі і меншому практично співпадають. При видавлюванні коробки з товщиною стінки $s = 2$ мм максимальні значення вказаних напружень 330 МПа, а при видавлюванні з $s = 3$ мм – 250 МПа. Абсолютні значення напружень

менші, чим на пуансоні, що також пов'язано з подоланням сил тертя при видавлюванні на контактуючій поверхні заготовки і матриці.

Розподіли нормальних (розпираючих) напружень на стінках матриці зображені на рис. 13. Величини нормальних напружень на матриці зі сторони стінки виробу розміром a_m та зі сторони стінки меншого розміру b_m практично однакові. Максимальні значення напружень по абсолютній величині мають місце напроти осередку

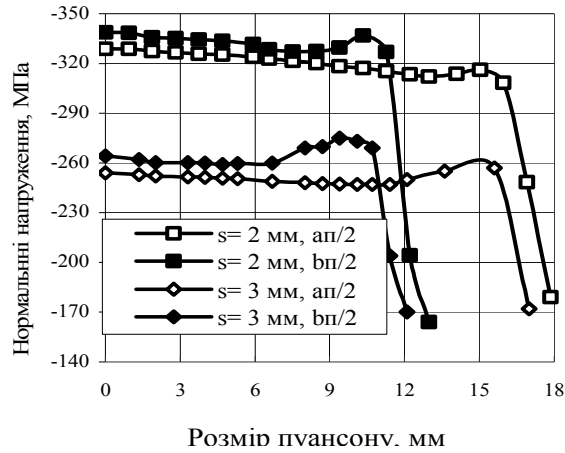


Рис. 11. Розподіл нормальних напружень на пуансоні

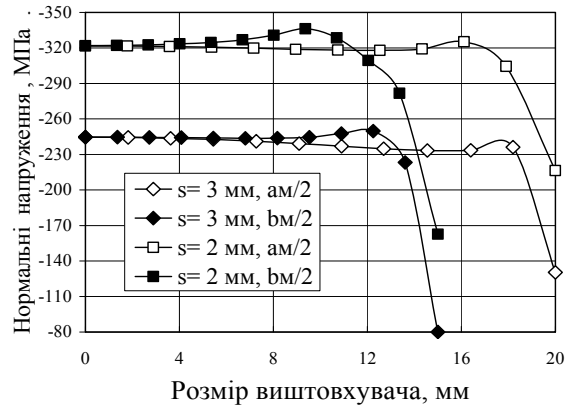


Рис. 12. Розподіл нормальних напружень на виштовхувачі

деформації в заготовці. При видавлюванні заготовок з товщиною стінки $s=2$ мм максимальне значення нормального напруження 330 МПа, а при видавлюванні з товщиною $s=3$ мм – 255 МПа.

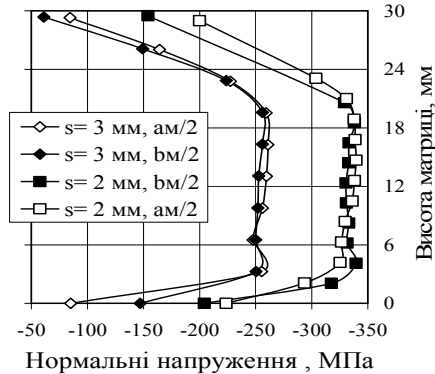


Рис. 13. Розподіл нормальних напружень на пуансоні

На рис. 14 показаний розподіл інтенсивності деформації ϵ_i . Показані перерізи по вісі коробчатих виробів по більшому a_m і меншому розмірах b_m (див. рис. 1). Інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією в заготовці під пуансоном ($\epsilon_i=0,82$) розповсюджується на глибину 8 мм при видавлюванні виробу з товщиною стінки $s=3$ мм і $s=2$. В виробі з $s=3$ мм в верхньому торці стінки $\epsilon_i=0,56$, а з $s=2$ мм - $\epsilon_i=0,9$. В самій стінці інтенсивність деформацій досягає величини 0,9 практично по всій ширині при видавлюванні з $s=3$ мм, а при видавлюванні з $s=2$ мм на внутрішніх шарах металу стінки $\epsilon_i=1,8$. На зовнішніх - $\epsilon_i=1,3$.

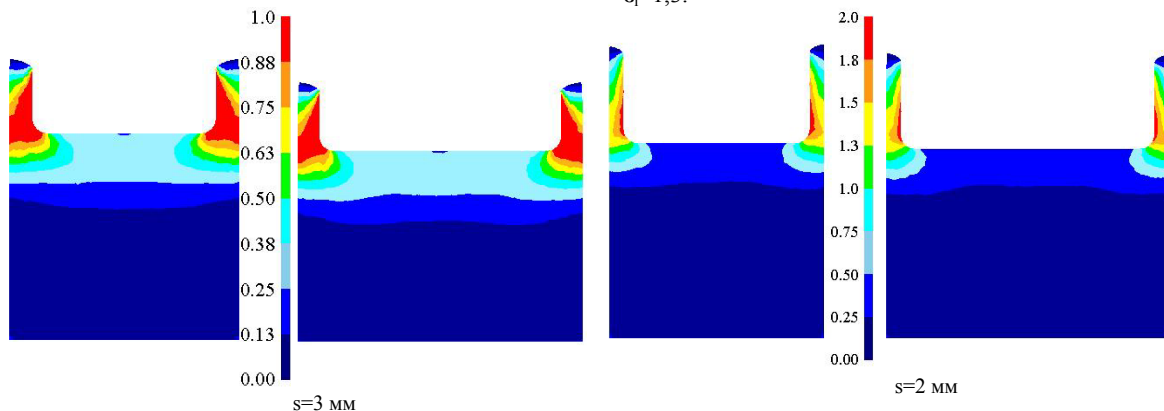


Рис. 14. Розподіл інтенсивності деформацій в перерізах по вісі коробчатих виробів по меншому і більшому розмірах

Розподіл інтенсивності напружень в вказаних перерізах здеформованої заготовки наведений на рис. 15. При видавлюванні виробу з $s=3$ мм осередок деформації розповсюджується на глибину 24 мм під пуансоном. При видавлюванні коробок з $s=2$ мм – на 26 мм. Таким чином, при видавлюванні прямокутних коробок висота осередку деформації відповідає меншому розміру пуансона. При досягненні осередком деформації торця заготовки виникають сили тертя між металом і виштовхувачем, що приводить до зростання зусилля видавлювання (друга неусталена стадія процесу).

Можливість формоутворення виробів без руйнування холодним видавлюванням визначається ступенем використання ресурсу пластичності здеформованого металу (ψ). На рис. 16 показаний розподіл ступеню використання ресурсу пластичності ψ в перерізах по вісі коробчатих виробів по меншому і більшому розмірах. При видавлюванні коробок з товщиною стінки $s=3$ мм в третині ширини стінки з внутрішньої сторони $\psi=0,9$ (при $\psi=1$

відбувається руйнування металу). По середині стінки $\psi=0,7$. В зовнішніх шарах металу стінки $\psi=0,56$. При видавлюванні з $s=2$ мм на половині ширини стінки з внутрішньої сторони $\psi=0,9$. В другій половині $\psi=0,7$.

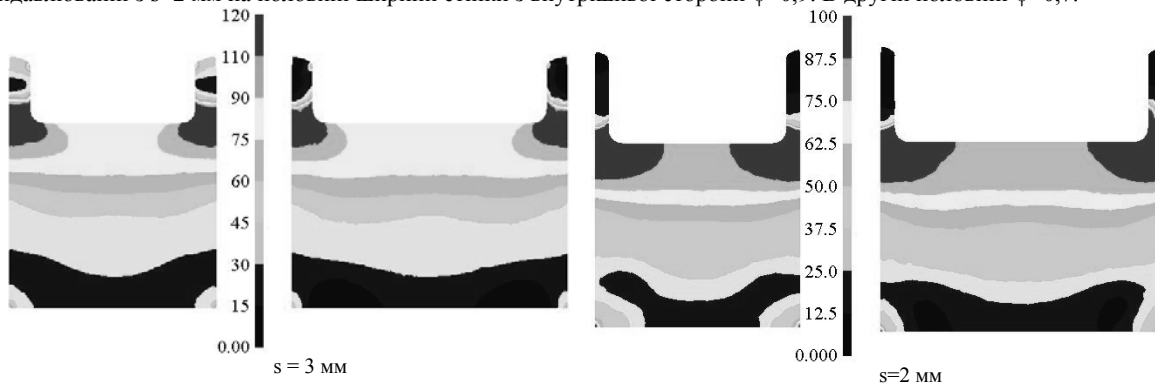


Рис. 15. Розподіл інтенсивності напружень в перерізах по висі коробчатих виробів по меншому і більшому розмірах



Рис. 16. Розподіл ступеню використання ресурсу пластичності ψ в перерізах по висі коробчатих виробів по меншому і більшому розмірах

Далі наведемо результати моделювання холодного видавлювання коробок з заготовки розміром $a_m=50$ мм, $b_m=30$ мм і $H=30$ мм (див. рис. 1) з товщиною стінки 2 і 3 мм (відповідно ступінь деформації складає 70 і 80 %. Здеформовані заготовки показані на рис. 17. На рис. 17а показана заготовка з товщиною стінки $s=2$ мм, а на рис. 17б

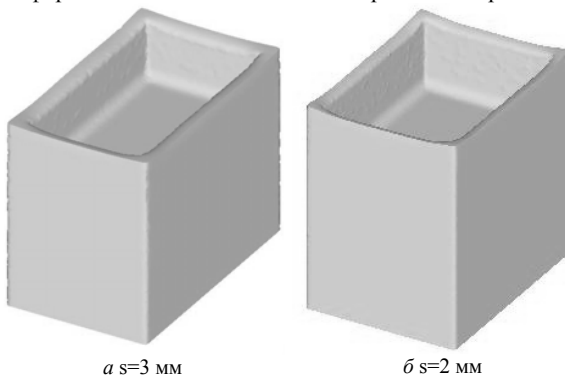


Рис. 17. Здеформовані заготовки: а – $s=3$ мм; б – $s=2$ мм

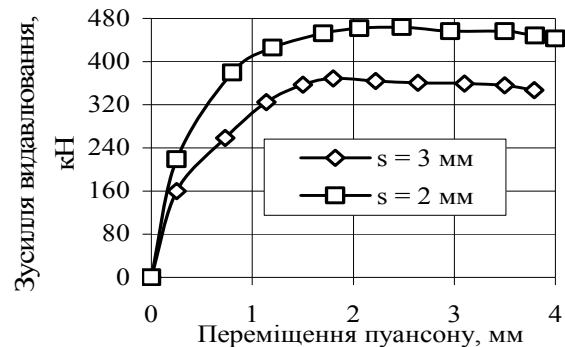


Рис. 18. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

з $s=3$ мм. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону представлена на рис. 18. Максимальне значення зусилля видавлювання для коробки з $s=2$ мм склало 462 кН, а для коробки з $s=3$ мм – 369 кН. Розподіли нормальних напружень на поверхнях заготовки, які контактують з пуансоном та виштовхувачем представлені на

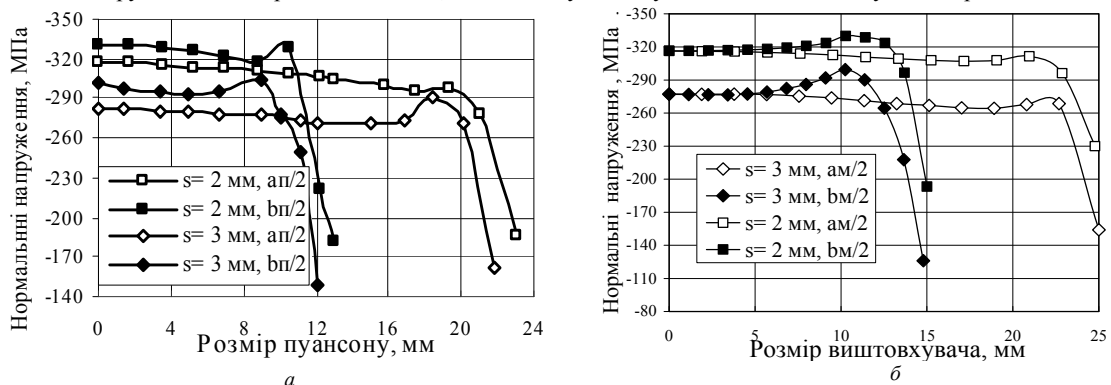


Рис. 19. Розподіли нормальних напружень на пуансоні і (а) виштовхувачі (б)

рис. 19. Розподіли вказаних напружень на більшому і меншому розмірі пуансона (рис. 19а) аналогічний попередньому випадку видавлювання коробок меншого розміру. Величина максимального напруження по

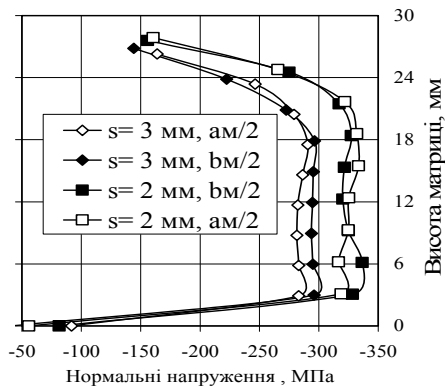


Рис. 20. Розподіл нормальних напружень на стінках матриці

заготовок осередок деформації розповсюджується на всю висоту заготовки під пуансоном. Зміцнення здеформованого металу в стінці виробу товщиною $s=3$ мм приводить до отримання умовної межі течії 900 МПа, а в стінці товщиною $s=2$ мм – 115 МПа.



Рис. 21. Розподіл інтенсивності напружень в перерізах по висі коробчатих виробів по меншому і більшому розмірах

Максимальне значення ступеню використання ресурсу пластичності здеформованого металу для вказаних розмірів товщини стінок досягає величини 0,9. Тому метал деформується без руйнування

На основі розрахункових даних розроблена технологія холодного видавлювання коробчатих виробів з порожниною квадратної і прямокутної форми. Технологія включає наступні операції: безвідхідна різка квадратних прутків на мірні заготовки зсувом в штампі; відпал, який необхідний для сталей заготовок; нанесення змащення; холодне видавлювання на гідравлічних пресах.

Висновки.

1. Розроблені скінченно-елементні моделі та проведений розрахунковий аналіз зворотного холодного видавлювання коробчатих виробів із сталі з квадратною порожниною та з алюмінію з порожнинами прямокутної форми.
2. Встановлені силові режими видавлювання та визначена робота деформації для вибору пресового обладнання.
3. Встановлені точні розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті і визначені їх максимальні значення: на пуансоні, виштовхувачі та на стінках матриці. Вказані дані необхідні для проектування штампного оснащення.
4. Виявлений напружено-деформований стан, зміцнення та ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу, що дозволяє прогнозувати механічні властивості в стінках виробів.
5. Запропонована ресурсозберігаюча, високопродуктивна технологія виготовлення коробчатих виробів холодним видавлюванням.

Список літератури.

1. В.А. Евстратов. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. / – Х.: Вища шк. изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.
2. Гречников Ф.В. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки/ Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др.; Под общ. ред. А.Г. Овчинникова// –М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. /Ред. совет: Е.И. Семенов (предс.) и др. –М.: Машиностроение, 1987, т.3. Холодная объемная штамповка /Под ред. Г.А. Навроцкого. 1987. -384 с.